

小型风力发电机控制器设计

杨龙飞,徐 力,史颖刚,刘 利

(西北农林科技大学 机械与电子工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:为调节风力发电机转速,控制蓄电池充电和负载供电,以 PIC16F716 型单片机为核心,利用仿真软件 Matlab/Simulink,建立了风速、风力矩与功率、发电机功率与转矩、Buck 电路模型。结果表明:通过调节 Buck 电路占空比,对风力发电机输出功率的最大值进行追踪,具有可行性;以定步长寻优控制法,对最大功率点追踪进行算法调节,具有有效性。

关键词:风力发电;单片机;最大功率点追踪;占空比;定步长;仿真

中图分类号:S213 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2767(2018)01-0120-05 DOI:10.11942/j.issn1002-2767.2018.01.0120

小型风力发电系统具有投资小且应用灵活的特点,非常适合在人口居住分散,风力资源丰富的西北地区和边远地区,解决农业、牧区和边防哨所的生产作业中的电力供应,对边远地区的广大农、牧民的生产用电,具有重要意义^[1]。离网型风力发电系统,具有架设方便、成本低廉、形式灵活等优点,可满足上述用电需求,因而得到广泛应用^[2]。

1 系统构造

由图 1 可看出,风力发电的系统由风力机、永磁发电机、控制系统、整流电路、斩波电路、直流负载及蓄电池组成。风力机将风能转换为机械转矩,机械转矩带动发电机进行发电,发出的电经过整流电路及斩波电路转变为相对稳定地直流电压,提供给直流负载使用,同时还能给蓄电池充电。当风力较小无法满足负载时,由电池给负载供电。

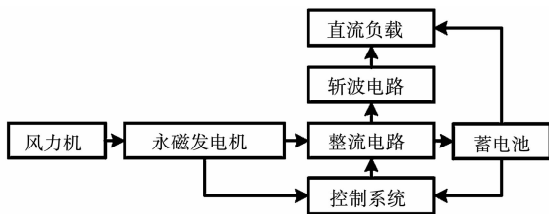


图 1 风力发电系统结构

Fig. 1 The structure of the wind power system

2 风力发电的最大功率追踪

风力机的能量转换效率,对提高发电效率,具

有重要意义^[3]。风力机的机械转矩为

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{1}{2} \rho \pi C_P R^3 \frac{V^2}{\lambda} \quad (1)$$

公式(1)中, P 为风力机实际获得的功率, ω 为风轮角频率, ρ 为空气密度, C_P 为风能利用系数, R 为风轮半径, V 为上游风速, λ 为叶尖速比。由公式(1)可知,风力机的机械转矩受风速 V 、叶尖速比 λ 、风轮半径 R 、风能利用系数 C_P 的影响。

风速 V 是随机变量,利用双参数威布尔概率密度函数,拟合风速频率分布。威布尔分布函数为:

$$f(V) = \frac{K}{C} \left(\frac{V}{C} \right)^{K-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{C} \right)^K \right] \quad (2)$$

其中, K 为形状参数, C 为尺度参数。

双参数威布尔分布函数的曲线峰值,对应启动风速(见图 2)。令公式(2)的一阶导数等于 0,因为 $C \neq 0, K \neq 0$,则有:

$$V_s = C \cdot \sqrt[K]{\frac{K-1}{K}} \quad (3)$$

因此,选用接近公式(3)的启动风速,是最为理想的。

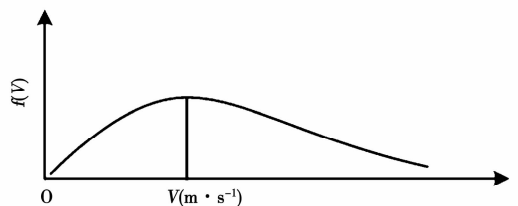


图 2 威布尔分布曲线

Fig. 2 The weibull distribution curve

已知风能密度 ρ , 风力机的效率 η , 桨叶半径 R , 则输出功率 $W(V)$ 的威布尔分布函数

收稿日期:2017-11-09

基金项目:西北农林科技大学教育教学改革研究资助项目(JY1702022)

第一作者简介:杨龙飞(1996-),男,河南省驻马店市人,在读学士,从事机械电子工程研究。E-mail:2924280803@qq.com。

$$W(V) = \frac{\eta}{2} \rho \pi r^2 V^3 \frac{K}{C} \left(\frac{V}{C} \right)^{K-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{C} \right)^K \right] \quad (4)$$

$W(V)$ 函数曲线峰值对应额定风速, 此时风力机利用的风能最多。令其一阶导数等于 0, 有

$$V_P = C \cdot \sqrt[K]{\frac{K+2}{K}} \quad (5)$$

根据国内风力机的情况, 结合西北地区条件, 预定启动风速 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大风速 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 额定风速 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

风力机的风能利用系数与叶尖速比密切相关^[4-5], 改变风叶的桨距角 β 和半径 R , 可改变风力机的实际受风面积, 使风叶最大程度地吸收风能, 从而使风力机输出功率最大。

目前, 常用的最大风能追踪控制^[6-7]主要有 3 种方法: 最佳叶尖速比法, 功率反馈法和爬山搜索法。通过分析可知: 风速一定时, 风力机有一个最佳转速 ω , 在该转速下, 风力机将达到一个最佳叶尖速比 λ , 输出的最大功率:

$$P = \frac{1}{2} \rho S C_P \left(\frac{R\omega}{\lambda} \right)^3 \quad (6)$$

由公式(6)可知, 风力机的输出功率 P 是转子转速 ω 的函数, 控制转子转速, 就可控制输出功率^[8]。使用 Buck 变换器为主控电路拓扑, 进行风力发电最大功率点追踪, 可提高风力发电的利用效率(见图 3)。

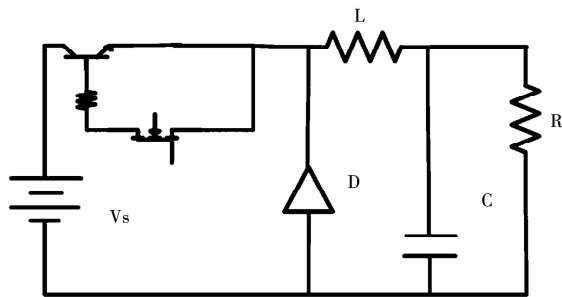


图3 Buck变换原理

Fig. 3 Principle of Buck transform

风力机在最大功率点时, 公式(6)的一阶导数为零, 即 $dp/d\omega = 0$, 其展开式

$$\frac{dp}{d\omega} = \frac{dp}{dD} \cdot \frac{dD}{dU_{in}} \cdot \frac{dU_{in}}{d\omega_e} \cdot \frac{d\omega_e}{d\omega} \quad (7)$$

在 Buck 电路中, 输入电压 U_{in} 、输出电压 U_{out} 、占空比 D 三者之间, 满足 $U_{out}/U_{in} = 1/D$, 故 $dD/dU_{in} = 1/U_{out} \neq 0$ 。由于 Buck 电路的输

出电压, 与发电机相电压的角速度 ω_e , 成比例关系, 所以有 $dU_{out}/d\omega_e \neq 0$, 从而 $dU_{in}/d\omega_e \neq 0$ 。根据交流电机理论, 风力机转子转速 ω 和发电机相电压的角速度 ω_e , 满足 $\omega_e = p \cdot \omega$, p 为发电机极对数, 对 ω 求导, 可得 $d\omega_e/d\omega = p \neq 0$ 。

综上, 因 $dp/d\omega = 0$, 故 $dp/dD = 0$ 。可知: 通过调节 Buck 电路的占空比 D , 可以对风力发电机的最大输出功率点进行追踪^[9]。应用中, 一般使用单片机加上外围电路, 实现各种控制功能, 所以需要设计相应的控制算法, 编制相应的程序, 实现利用 Buck 电路占空比的变化, 来追踪最大功率点。在进行最大功率点追踪算法调节的时候, 本文采用定步长寻优控制法。

3 控制系统设计

额定功率恒定的小型风机, 风速过大、过小时, 要调节风力发电机的转速, 间接地控制发电机的输出电压, 使其输出电压保持在允许范围内, 为蓄电池的充电或外接负载, 提供稳定的电压; 同时, 根据风力发电机的运行情况, 对蓄电池进行充、放电控制。

3.1 系统控制原理

系统选用的小功率定桨距风力发电机^[4,10], 其桨距角保持 0° 不变; 风力发电机控制器带有一个能耗负载, 来吸收多余电能和对风力机进行转速控制; 系统采用 PWM 方式, 对蓄电池进行充电; 系统工作时, 能对负载供电, 同时检测蓄电池端电压和充电电流, 判断蓄电池的荷电状态, 决定充电模式(见图 4、图 5)。

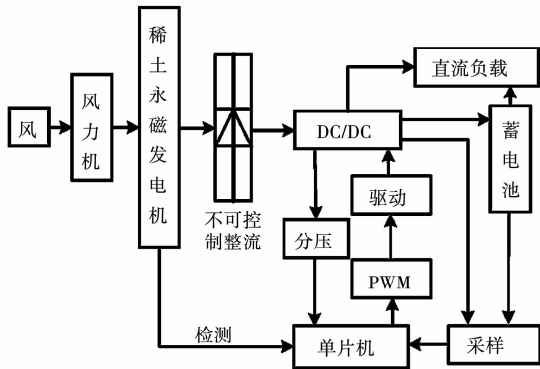


图4 系统控制架构

Fig. 4 The structure of control system

3.2 程序流程

由图 6 可知, 主程序模块对 CPU 的各寄存器和端口进行初始化, 设定相关的功能标志位等, 之

后,系统进入正常的工作循环。在程序运行过程中,利用单片机中的定时器中断功能实现发电机转速检测和整流输出端电压检测。

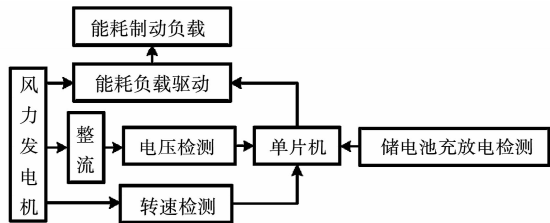


图 5 系统控制原理

Fig. 5 The principle of system control

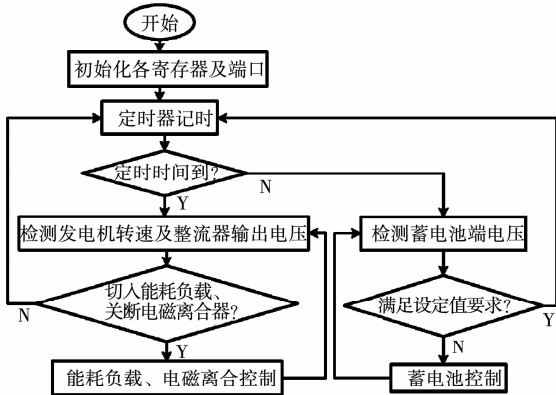


图 6 主程序流程

Fig. 6 The flow diagram of master program

由图 7 可知,发电机实际转速 N , 最高额定转速 N_{\max} , 实际整流输出电压 U , 系统最高额定输出电压 U_{\max} 。

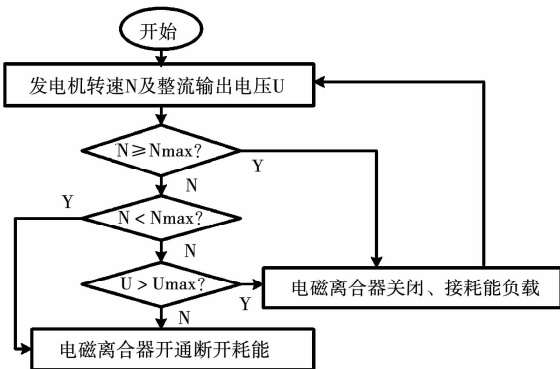


图 7 能耗负载子程序流程

Fig. 7 The flow chart of energy consumption load subroutine

由图 8 可知,系统选用 24V 的蓄电池,则额定充电电压 $U_H = 27\text{ V}$, 极限放电电压 $U_L = 22\text{ V}$ 。假设,蓄电池端电压为 U_0 ,根据测得的蓄电池端电压,判断是否切断负载,或者进行 PWM 调节。

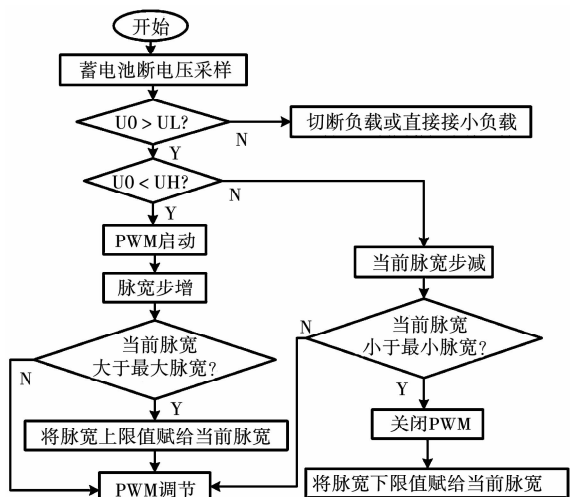


图 8 蓄电池充电流程

Fig. 8 The flow chart of accumulator charging

图 9 是最大功率追踪子程序流程图,初始化占空比 D , 设定为 30%。

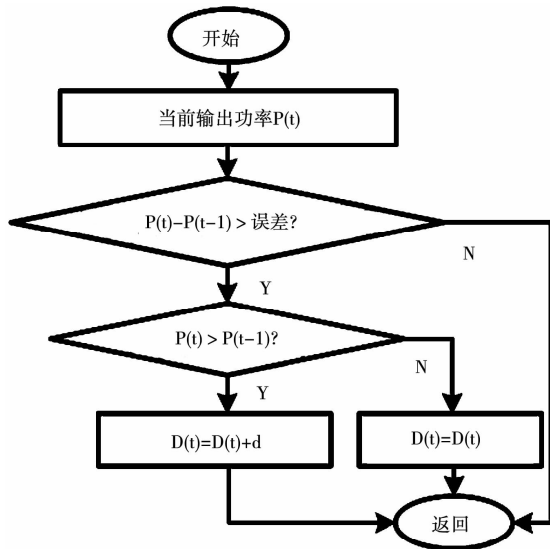


图 9 最大功率追踪子程序流程

Fig. 9 The flow chart of maximum power tracking subroutine

4 风力发电系统 Matlab 仿真

利用仿真软件 Matlab/Simulink, 建立风速、风力矩与功率、发电机功率与转矩和 Buck 电路模型, 并进行仿真^[8]。

4.1 风速模型及仿真

风速模型采用四分法, 即把风速分成 4 个部分: 基本风速 V_B , 阵风 V_G , 渐变风 V_R 和背景噪声 V_N 。具体公式如下: $V_W = V_B + V_G + V_R + V_N$ 。

基本风 V_B 描述风电场附近风速长期平稳的变化,由风电场附近所得的威布尔分布参数近似确定,公式为 $V_B = A \cdot \Gamma(1 + 1/K)$ 。式中 A 为威布尔分布的尺度参数, k 为威布尔分布的形状参数, Γ 为伽马函数。

阵风 V_G 是风速突然发生变化时的风速变化特性,一般用 $V_G = 1/2 \cdot V_{G\max} [1 - \cos(2\pi t/T_G)]$ 表示。式中 $V_{G\max}$ 为阵风速度最大值, T_G 为阵风周期。

渐变风 V_R 模拟风速的渐变特性,其过程为渐变风开始时, $V_R = V_{R\max} \cdot [(T_{1R} - t)/(T_{1R} - T_{2R})]$; 渐变风结束后 $V_{R\max}$ 会持续一段时间。其中 $V_{R\max}$ 为可能出现的渐变风风速最大值, T_{1R} 、 T_{2R} 、 T 分别为渐变风开始时间、渐变风结束时间、渐变风保持时间。

随机噪声 V_N 表示风速变化的随机性,公式为 $V_N = 2 \sum \sqrt{S_v(\omega_i)} \cdot \Delta\omega \cdot \cos(\omega_i + \varphi_i)$ 。其中 $\omega_i = (i - 0.5) \cdot \Delta\omega$, $S_v(\omega_i) = 2K_N F^2 |\omega_i| / \pi^2 [1 + (F\omega_i/\mu)^2]^{4/3}$ 。式中 φ_i 指 0 到 2π 之间均匀分布的随机变量, K_N 指地表粗糙系数, F 指扰动范围, μ 指相对高度的平均风速, N 指频谱取样点数, ω_i 指各个频率段的频率。

利用 Matlab/Simulink, 参考基本风、阵风、渐变风、随机风等构建风速模型。仿真中,基本风保持 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 不变,随机风给定为零,噪声随机变量振幅为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均值为零;在 2~6 s 时有渐变风作用,渐变风的初始幅值为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,渐变风幅值达到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 后,再持续作用 8 s,然后跳变为 0;在 5 s 时启动阵风,幅值为 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (见图 10)。

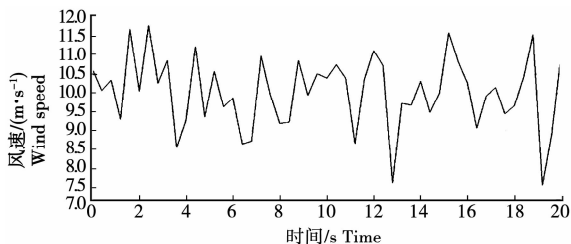


图 10 风速仿真波形

Fig. 10 The simulation waveform of wind speed

4.2 最大风能利用系数建模及仿真

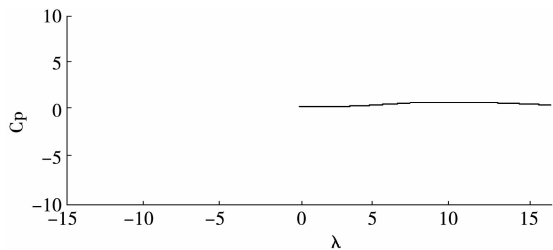
把最佳叶尖速比 λ 、矩角 β 作为输入量,最大风能利用系数 C_p 作为输出量,公式为:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \frac{C_5}{\lambda_i} + C_6 \lambda \quad (8)$$

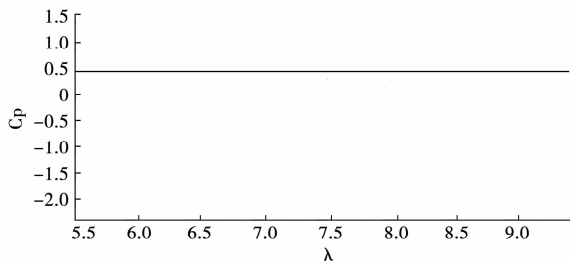
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (9)$$

其中: $C_1 = 0.5173$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0.4$, $C_4 = 5$, $C_5 = -21$, $C_6 = 0.0068$ 。

当矩角 β 恒定时,在不同的风速下,只要能保持风力机在其最佳叶尖速比 λ 下运行,就可确保风力机能取得最大风能利用系数。先假定矩角 β 为 0,仿真得到在不同叶尖速比 λ 时,风力机的最大风能利用系数,从而确定最佳叶尖速比 λ 。仿真结果见图 11。

图 11 λ 与 C_p 对应仿真曲线Fig. 11 λ and C_p correspond to simulation curves

根据图 11 仿真曲线, λ 在 8~10 时,存在最大风能利用系数。取 λ 为 8~10 的数 (每隔 0.1 取一次值),得出 λ 为 8.1 附近可使 C_p 最大,最大为 0.49,仿真结果见图 12。

图 12 C_p 仿真曲线 ($\lambda = 8.1$)Fig. 12 C_p simulation curves ($\lambda = 8.1$)

4.3 风机功率、风力距仿真

拟定空气密度为 $1.229 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,桨距角为 0,叶片半径为 1 m (见图 13、图 14)。

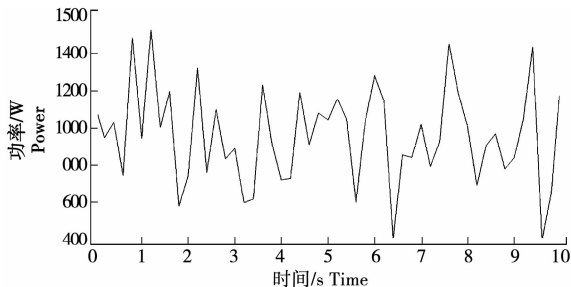


图 13 风机功率仿真波形

Fig. 13 The simulation waveform of fan power

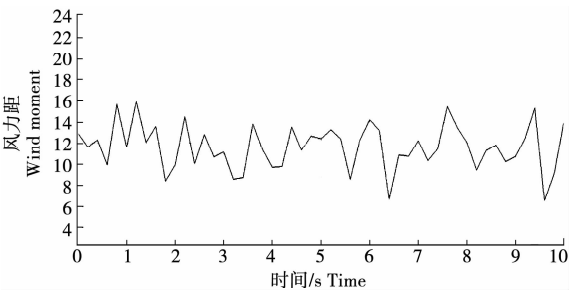


图 14 风力矩仿真波形

Fig. 14 The simulation waveform of wind moment

4.4 发电机仿真

系统选用稀土永磁同步发电机^[3],选用 Simulink 中自带的永磁发电机模型^[5],代替系统发电机进行仿真,根据风机输出的转矩选择发电机内部参数(见图 15)。

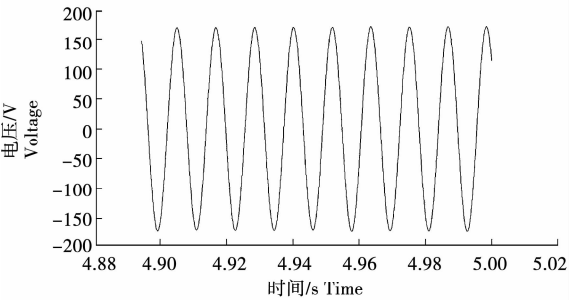


图 15 发电机电压波形

Fig. 15 Voltage waveform of generator

4.5 系统综合仿真

控制 Buck 电路占空比 D ,进行输出功率控制的 Simulink 仿真验证。恒定转矩输入,通过整流桥后,得到的电压波形(占空比 D 为 30%) (见图 16)。在不同占空比情况下的风机功率输出的仿真结果见表 1。

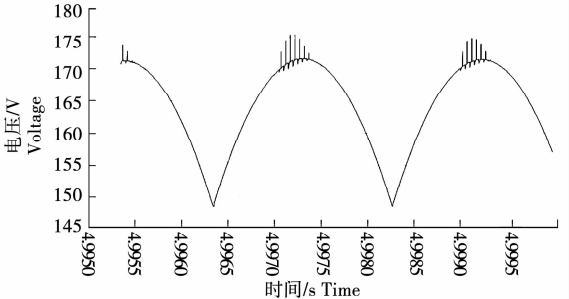


图 16 整流后输出电压波形

Fig. 16 The waveform of output voltage after rectifying

由数据和仿真结果可以看出,占空比越大,风机输出的功率越大,即供电系统得到的功率越大。由仿真结果可知,调节系统输出功率,可通过调整

主开关管的占空比来实现。

表 1 不同占空比下风机功率输出

Table 1 The output of fan power in the different duty cycle

| 占空比/% Duty cycle | 功率/W Power |
|---------------------|---------------|
| 40 | 580 |
| 50 | 650 |
| 60 | 710 |
| 70 | 880 |
| 80 | 905 |

5 结语

本研究设计了一种小型永磁同步交流风力发电机的控制器,可进行发电机的转速调节、蓄电池充放电控制,以及对负载供电的控制。采用 Matlab/Simulink 仿真软件,建立了风速、风力矩与功率、发电机功率与转矩、Buck 电路模型,并进行仿真验证。由于风力机系统是非线性的复杂系统,工作环境的影响和干扰多。因此,理想数学模型与实际系统的输出,有一定差别,实际应用中,应多采用实验数据,对理想数学模型进行调整,使风力发电机的相关模型,更符合实际情况。

参考文献:

[1] 叶飞. 基于成本分析的小型风力发电机组供能系统的优化改进[D]. 济南:山东大学,2015.

[2] 孙玉龙. 基于混合储能的小型风力发电系统能量管理研究[D]. 济南:山东建筑大学,2015.

[3] 徐培风,刘贤兴,施凯. 垂直轴离网型异步电机风力发电系统控制和能量管理策略[J]. 电力系统自动化,2013, 37(14):13-18.

[4] 胡林林,付龙. Matlab 仿真软件在电机与拖动中的应用[J]. 电子世界,2017(11):120,122.

[5] 王世标,张彦兵,胡卫东,等. 基于 Simulink 研发的实时仿真器中动态负荷元件的改进控制策略[J]. 电力学报,2017, 32(2):152-158.

[6] 李航. BUCK 电路间接电容电流控制数字算法研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.

[7] 马燕,徐立军. 离网型风光互补系统控制策略探讨[J]. 热能动力工程,2016,31(1):1-12,127.

[8] 邓鑫. 小型开关磁阻风力发电机系统研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2016.

[9] 曹莹. 智能风力发电逆变器研究[J]. 电源技术,2015, 39(11):2537-2539.

[10] 刘军,赵晨聪. 电网电压不平衡时对风电并网逆变器的控制研究[J]. 电气传动,2016,46(4):50-54,79.

发展汉麻产业,促进农民增产增收,助力黑龙江省经济发展。

参考文献:

- [1] 何锦凤,陈天鹏,卢蓉蓉,等.汉麻籽的综合利用及产业化研究[J].中国食品学报,2010,10(3):98-112.
- [2] 张建春,张华,张华鹏,等.汉麻综合利用技术[M].北京:长城出版社,2006.
- [3] 树文,刘华.工业大麻的开发利用及其市场前景[J].技术创新,2005,10(8):22-26.
- [4] Callaway L C. A Positive urinalysis from hemp (*Cannabis*) seed oil [J]. Journal of Analytical Toxicology,1997,21(4):319-320.
- [5] 崔景富,王福军,王丽颖,等.汉麻及开发前景[J].垦殖与稻作,2006(S1):118-119.
- [6] 宋宪友,张利国,房郁妍,等.黑龙江省发展大麻的优势与主要栽培技术[J].中国麻业科学,2011,33(1):27-30.

- [7] 宋宪友.大麻高效除草(封闭)技术研究[J].中国麻类科学,2012(2):81-84.
- [8] 宋宪友,张利国,房郁妍,等.大麻新品种龙大麻一号再生体系初探[J].中国麻业科学,2012(3):112-114.
- [9] 房郁妍,宋宪友,张利国,等.大麻平衡施肥技术研究[J].农业科技通讯,2014(3):111-114.
- [10] 房郁妍,宋宪友,张利国,等.龙大麻1号良种繁殖技术[J].黑龙江农业科学,2014(4):156-158.
- [11] 宋宪友,张利国,房郁妍,等.氮、磷、钾施用对大麻原茎产量影响的研究初报[J].中国麻类科学,2012(3):115-117.
- [12] 吕江南,马兰,刘佳杰,等.黑龙江省工业大麻产业发展及收获加工机械情况调研[J].中国麻业科学,2017,39(2):94-102.
- [13] 黄峰华.黑龙江省麻类产业现状及发展建议[J].辽宁农业科学,2017(5):70-71.
- [14] 吴广文.促进黑龙江省亚麻产业发展的思路[J].中国麻业科学,2014,36(1):51-54.

Advantages and Countermeasures of the Development of Hemp Industry in Heilongjiang Province

ZHANG Shu-quan¹, WANG Gui-jiang², SONG Xian-you¹, ZHANG Li-guo¹, FANG Yu-yan¹, ZHENG Nan¹, WU Guang-wen¹

(1. Institute of Industrial Crops, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin, Heilongjiang 150086; 2. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin, Heilongjiang 150086)

Abstract: In order to promote hemp industry development, the characteristic, development potential, advantages and the situation of hemp industry in Heilongjiang province were discussed, and 8 aspects of the future development countermeasures were put forward, such as strengthening the organizational leadership, strengthening the industrial guidance, giving policy-based financial support, strengthening scientific and technological innovation, setting industry standards, accelerating green organic cultivation, playing a role in industry alliance and creating a good environment for development.

Keywords: Heilongjiang province; hemp industry; advantage; countermeasure

(该文作者还有宋喜霞、陈晶,单位同第一作者)

(上接第 124 页)

Design of Small Wind-power System Based on the Chip Microcomputer

YANG Long-fei, XU Li, SHI Ying-gang, LIU Li

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to adjust the speed of the wind generator, control the accumulator charging and control the load power supply, based on PIC16F716 chip microcomputer and using the simulation software Matlab / Simulink, the wind speed, the wind moment and power, the generator power and torque and the Buck circuit model were established. The results showed that adjusting the duty cycle of the Buck circuit was feasible for tracking the maximum power of the wind generator and the algorithm adjustment of maximum power point tracking was effective by using the fixed step optimization.

Keywords: wind power generation; chip microcomputer; maximum power point tracking; the duty cycle; fixed step; simulation